

IMPORTANCIA DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS YACIMIENTOS PARA SU APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE: EL EJEMPLO DE MISKY, PERÚ

PALACIOS, SILVIA Y ALFONSO, PURA

Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals, Universitat Politècnica de Catalunya

Av. de les Bases de Manresa, 61-73, 08242 Manresa

E-mails: silvia@emrn.upc.edu, pura@emrn.upc.edu

RESUMEN

El yacimiento de oro de Misky, sur del Perú, es explotado de manera artesanal. La explotación se realiza sin conocimientos sobre la geología y mineralogía de las menas. En el presente trabajo se hallan las características del yacimiento con el objetivo de determinar el origen de este y de esta manera facilitar una explotación más sostenible. Se ha realizado un estudio geológico del área, la mineralogía del yacimiento y la caracterización de los fluidos mineralizantes que formaron el depósito mediante microtermometría de inclusiones fluidas y análisis de isótopos de azufre en los sulfuros.

El yacimiento de Misky está constituido por vetas arrosariadas de cuarzo, con potencias que varíen entre 0,2-2m, su dirección principal es E-W. Se encuentra encajado en rocas magmáticas de edad cretácica. La mineralogía está constituida principalmente por cuarzo con pirita y, en menor cantidad, calcopirita, esfalerita, oro nativo, galena, arsenopirita, electrum, bismuto nativo, calcosina, covellita, malaquita, azurita.

A partir del análisis de las inclusiones fluidas se determinó que los fluidos eran salinos (5-21% en peso de NaCl eq.) y pobres en CO₂. Las temperaturas de homogeneización se encuentran mayoritariamente entre 140 y 220 °C. La composición isotópica del azufre de los sulfuros presenta valores de $\delta^{34}\text{S}$ entre -2,3 y +5,4 ‰, la mayoría de los valores son inferiores al 3 ‰. Como resultado se determina que un origen del azufre es mayoritariamente magmático.

Los yacimientos de oro de Misky, presentan características similares a los de las tipologías de depósitos de oro relacionado son intrusivos. Sin embargo, al ser un estudio preliminar, es necesario varios estudios complementarios para poder determinar la topología de este depósito.

PALABRAS CLAVE: yacimientos de oro, vetas, Perú

INTRODUCCIÓN

Para conseguir una explotación racional y optimizada de un depósito es necesario conocer la geología del mismo. La morfología de la mineralización es muy importante para planificar la explotación. El conocimiento de la mineralogía de las menas y sus características texturales y granulométricas son muy importantes a la hora de diseñar el

procesamiento de estas menas para la extracción del metal a explotar. Asimismo, tanto para la prospección de nuevos yacimientos cercanos al que se está explotando, como para planificar la explotación cotidiana, es de gran utilidad conocer la tipología del depósito en que se está trabajando.

Perú es muy rico en yacimientos de oro, pertenecientes a gran variedad de tipologías. La mayoría de ellos están relacionados con los procesos de subducción entre placas, principalmente la de Sur-América y la de Nazca. Relacionados con batolitos graníticos se encuentran algunos de estos depósitos. Este es el caso de los depósitos del batolito de Pataz, de edad paleozoica y de los del batolito Costero, al que pertenece el cinturón de Nazca-Palpa-Ocoña. Este último cuenta con más de 70 depósitos (Vargas, 1978), uno de los cuales es el de Posco-Misky. Otros de los alrededores son Calpe, Ishihuinca, Ocoña, Sol de Oro, Los Incas, San Juan de Churunga, Quimbaleta y San Luis (Steinmüller, 1999). Existen muy pocas referencias sobre de estos depósitos y sobre todo en el caso de Misky, de donde no se encuentra bibliografía.

Cerca de Misky existen depósitos epitermials de oro y plata situados en la provincia de Puno, Shila - Paula que bien conocidos (André-Meyer et al., 2002; Chauvet et al. 2006).

Los yacimientos de Misky se encuentran en la parte sur del cinturón de Nazca-Ocoña (Calpe, Ishihuinca). Este cinturón se extiende más de 350 km a lo largo de la costa del Perú. La zona de estudio en el Valle de Misky, contiene un área de 2 km de largo y unos 40 m.

Los yacimientos de oro de Misky en Perú (**Fig. 1**), forman vetas que se explotan por minería artesanal desde 2002, en general aprovechando antiguas galerías. La explotación actual se hace sin estos conocimientos, mediante métodos que probablemente no son los que más beneficios económicos pueden producir. Para diseñar un método de extracción adecuado hay que tener buenos conocimientos de las características del oro y los minerales que lo acompañan.

Desde un punto de vista más social, la poca información que disponen los mineros artesanales en cuanto a la tipología y características de los minerales, hace que no sea correspondido el esfuerzo del trabajo con el beneficio que obtienen. Por lo tanto una buena caracterización de depósito mejoraría el rendimiento económico del mismo.

Con el presente estudio preliminar se pretende establecer la geología del yacimiento de Misky, caracterizar su mineralogía y determinar los fluidos formadores para poder establecer un modelo del depósito. Es imprescindible obtener la cartografía geológica del área, caracterizar la mineralogía del yacimiento y definir los posibles controles de la mineralización. En resumen, se pretende obtener información que facilite el establecimiento de un modelo preliminar del yacimiento.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La mineralización aurífera de Misky se encuentra en vetas de cuarzo encajadas en diferentes tipos de litologías correspondientes al llamado batolito Costero del Perú. El batolito Costero forma una alineación de diferentes plutones lo largo de unos 1600 Km paralelamente a toda la costa del Perú. En ellos se diferencian dos segmentos, el

segmento de Lima, con 11 unidades y el segmento de Arequipa, con 5 unidades, PataPi, Linga, Pampahuasi, Incahuasi y Tiabaya (Cobbing, 1982).

Desde el río Ocoña hasta Misky primero se encuentran materiales precámbricos representados por el *Complejo Basal*, que está constituido por gneises bandeados y anfibolitas. Más hacia Misky afloran las rocas del batolito Costero, pertenecientes al Cretácico Superior, que aquí está formado por dos de las cinco unidades en que se subdivide. Aparecen tonalitas de la unidad de Incahuasi y una intrusión posterior que corresponde a granodioritas y dioritas de la unidad Tiabaya (Cobbing, 1982). Estos materiales se encuentran cortados por otro grupo de rocas intrusivas hipabisales correspondientes al complejo Bella Unión, formado por andesitas y dacita porfídicas. A menudo es en el contacto de estos pórfidos y la roca plutónica es donde se emplazan las vetas de cuarzo que llevan el oro (**Fig. 2**).

Los materiales descritos se encuentran recubiertos por ignimbritas, que afloran en el sector sur de Misky y materiales sedimentarios del Paleógeno, pertenecientes a la Formación Sotillo. Están formados por conglomerados poco consolidados y areniscas con intercalaciones de yesos y anhidrita. Estos materiales son rojizos o beige muy claro y tienen un origen continental. Por encima, se encuentran los conglomerados con areniscas y blandas miocenas de la formación Moquegua. En esta formación también afloran yesos. Estos son abundantes, con cristalizaciones de tamaño de más de un cm. Los conglomerados contienen unos clastos que en ocasiones presentan un tamaño muy grande, hasta 50 cm de diámetro. Estas formaciones con material poco consolidados o formando estratos con muy poca inclinación, entre 5 y 20°. Por encima de los 1200 m aparece una capa de sedimentos formados por arenas con yesos y sales. A un km al norte de las minas se encuentra la quebrada de Posco, los cercados de la que afloran abundantes sedimentos cuaternarios de origen aluvial.

El Sur del Perú es, desde el punto de vista tectónico, una región muy activa debido a la interacción de la placa de Nazca y la de América del Sur. Con menor efecto también se ha de incluir el efecto de la interacción de las placas menores próximas como la de Cocos y la del Caribe. Estas características generales hacen que exista una fracturación muy intensamente desarrollada en la zona. Los sistemas de fracturas más desarrollados son uno con dirección ENE-WNW y 70-80° de buzamiento y otro sistema perpendicular al anterior, NNE-SSW, con similar buzamiento.

Las vetas se encuentran principalmente en el contacto entre los diques de pórfido andesítico y sus encajantes o rellenando fracturas. Se siguen durante más de 3 km, tienen una morfología arosariada, con una anchura normalmente inferior a 2m. Presentan una dirección E-W y buzamiento entre 70 y 90° (**Fig. 3**). La mineralización en las vetas se encuentra distribuida de forma irregular y asimétrica.

Las principales vetas son la de Siete bocas, ubicada al norte del asentamiento minero, a la zona este se encuentra Panpachacra, al sur la llamada nivel 950 m y al oeste la zona de Charpera (**Fig. 4**). El presente estudio se ha centrado en la zona de Charpera.

MÉTODOS ANALÍTICOS

Para determinar las características del yacimiento se hizo un muestreo exhaustivo de la zona. Se muestrearon unas 20 labores mineras, a lo largo de las vertientes de todo el

valle de Misky, con unas 200 muestras en total. De estas muestras se han elegido una serie representativas de la veta de Charpera para hacer el estudio del yacimiento.

Se han confeccionado láminas delgadas con pulido metalográfico y probetas. Se ha realizado un estudio petrográfico mediante la microscopía óptica de luz transmitida y de luz reflejada.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) con analizador de dispersión de energías (EDS) se ha utilizado para hacer un análisis cualitativo de los elementos presentes en las fases minerales. Para realizar el análisis se utilizó un Jeol 360, en los Servicios Científico-técnicos de la Universidad de Barcelona.

Se ha realizado un estudio preliminar de microtermometría de inclusiones fluidas en tres muestras de cuarzo de las vetas mineralizadas. Se ha utilizado una platina Linkam TH600. Las medidas se han realizado siempre en inclusiones aparentemente primarias. La precisión en las medidas de baja temperatura es de $\pm 0.2^\circ \text{C}$ y a alta temperatura de $\pm 1^\circ \text{C}$. La Salinidad de los fluidos se calculó a partir de las temperaturas de fusión del hielo mediante la ecuación de Bodnar (1990) y se presenta en peso% de NaCl equivalente.

También se ha realizado un estudio isotópico del azufre en muestras de sulfuros. Se determinó la composición isotópica de azufre en 51 muestras, de las cuales 4 eran de galena, 1 de arsenopirita, 34 de pirita y 12 de calcopirita. La separación de los minerales analizados se hizo de forma manual. Los resultados se han dado en $\delta^{34}\text{S} \text{ ‰}$ respecto al estándar CDT (troilita del Cañon del Diablo). Los análisis se realizaron en los Serveis Científicotècnics de la Universitat de Barcelona mediante un espectrómetro de masas de flujo continuo Delta C Finnigan MAT masa Delta-S, con un analizador elemental TC-EA. Las relaciones isotópicas se calcularon utilizando patrones NBS-127, YCEM, IAEA-S1 y IAEA-S3. La precisión analítica se encuentra alrededor de $\pm 0,2 \text{ ‰}$.

RESULTADOS

Mineralogía de los depósitos

Las vetas están formadas mayoritariamente por cuarzo en el que se encuentran pirita, calcopirita, oro nativo, electrum, esfalerita, galena, arsenopirita, calcosita, y minerales de alteración como covellina, malaquita, azurita y hematites. Aparecen cantidades menores de calcita en algunas vetas. Las alteraciones hidrotermales asociadas a la mineralización son principalmente una sericitización, cloritización y silicificación en los alrededores de las vetas.

Se ha reconstruido una secuencia paragenética de los minerales presentes en las vetas de oro de Misky, basada en tres estadios. El estadio I o de la mineralización primaria, un segundo estadio de fracturación y relleno de las fracturas, y un tercer estadio de alteración supergénica.

La secuencia comienza con la deposición de cuarzo policristalino. El primer sulfuro a precipitar son pequeñas cantidades de arsenopirita seguidas de la pirita. A menudo ésta se encuentra como cristales idiomórficos o hipidiomórficos de hasta 1mm de diámetro. Incluidos en esta pirita se encuentran grandes de oro nativo, electrum y

bismuto nativo. El oro nativo se encuentra como inclusiones dentro de la pirita en cristales de morfología regular usualmente no supera las 80 micras. El electrum aparece principalmente en fracturas tardíamente (**Fig. 5**).

Inclusiones fluidas

Las inclusiones fluidas se han estudiado en cuarzo perteneciente a las vetas en las que se encuentra la pirita que contiene la mineralización de oro. Las inclusiones observadas presentan un tamaño muy pequeño, de hasta unas 10 μm , presentan dos fases, una líquida y otra vapor, que representa entre el 10 y 15% del volumen total de la inclusión. Estas inclusiones presentan forma regular aunque en las muestras también hay algunas con morfologías irregulares probablemente causadas por transformaciones posteriores a su formación. Se presentan aisladas, siguiendo las aristas de los cristales de cuarzo o alineadas. Por su disposición se pueden considerar como primarias, es decir, que son restos de fluido que han quedado atrapados en el momento en que se formaba los cristales de cuarzo que las contienen y, por lo tanto, sus características corresponden a las del fluido formador de las vetas. No se ha observado la presencia de CO_2 .

Primero se han congelado las inclusiones, sometiéndolas para ello a unas temperatura entre -40 y -120 $^{\circ}\text{C}$. Seguidamente se ha calentado lentamente y se ha registrado la temperatura a la que la inclusión descongela ($T_{\text{fH}_2\text{O}}$), que esta comprendida entre -18 y -3 $^{\circ}\text{C}$; esta temperatura depende de la salinidad de la inclusión. Seguidamente se ha continuado el calentamiento hasta llegar a la temperatura de homogeneización (T_{h}), que es aquella a la que la inclusión homogeniza, es decir, líquido y vapor se convierten en una sola fase; en este caso todas las inclusiones homogenizaron a líquido. Esta temperatura nos indica la temperatura mínima a la cual se han formado las vetas. Muchas inclusiones decrepitan cuando llegan a una temperatura de pocas decenas de grados por encima de su homogeneización, esto probablemente es debido a que se formaron a una presión elevada.

Las inclusiones analizadas nos indican que los fluidos presentan salinidades comprendidas entre el 5 y 21% en peso de NaCl eq. En otras muestras se ha observado algún cristal de cloruro sódico en el interior de alguna inclusión, lo que indica que hay algunos valores por encima del 23,3% en peso de NaCl eq., ya que ésta es la temperatura de saturación del NaCl en el sistema H_2O -NaCl.

Isótopos de S

Los valores de los isótopos de azufre se encuentran en un rango entre -1.2 y $+5.2$ ‰. La mayoría de los valores se roban entre $+1$ y $+3$ ‰. Se han diferenciado los valores de $\delta^{34}\text{S}$ según el mineral analizado y la ubicación de la muestra. Los valores más altos parecen estar concentrados en la zona de Charpera interior.

La mayoría de estos valores se encuentran en el rango típico del azufre de origen magmático. No obstante algunos valores, concentrados principalmente en Charpera Interior, son más altos y permiten interpretar que posiblemente en esta zona haya podido haber una mezcla de azufre no magmático. También vemos que los minerales más tardíos son los que presentan unos valores de $\delta^{34}\text{S}$ más elevados. Esto se puede interpretar como (1) que haya influencia de un fluido tardío de origen no magmático o (2) el cambio en las condiciones de oxidación del fluido puede hacer que los minerales

que precipitan tengan unos valores de $\delta^{34}\text{S}$ más elevados (Ohmoto, 1986). Existen evidencias de un aumento del carácter oxidante de los fluidos mineralizante como son la aparición de Calcosita y hematites.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los yacimientos de oro de Misky están formados por vetas de cuarzo encajadas en rocas magmáticas cretácicas correspondientes al batolito Costero. Existen varios controles de la mineralización: (1) por un lado, las vetas se encuentran preferentemente siguiendo el contacto entre las rocas plutónicas y diques de pórfido andesítico que los cortan. (2) También existe un control estructural importante, ya que además las principales vetas se encuentran rellenando fracturas.

En los yacimientos de oro de Misky, éste siempre va asociado a la pirita, por lo tanto, esta constituye valiosas guías de exploración, ya que ésta resulta, por su aspecto y abundancia, muy fácil de observar en el campo.

Estas vetas contienen oro en diferentes generaciones. La primera corresponde a oro nativo y se encuentra en granos encapsulados totalmente por pirita. La segunda es oro en forma de electrum, con cantidades variables de plata. Esta generación es más tardía y aparece rellenando fracturas que se encuentran en la pirita (**Fig. 6**). Diferenciar las generaciones de oro es importante para la minería artesanal de la zona. Actualmente para separar el oro de la mena, se utiliza la amalgamación con mercurio. Primeramente se muele el material mediante molinos quimbaletes, donde podemos observar que no todos los granos de oro quedan libres de la pirita, quedando mayoritariamente liberado el oro tipo electrum. En pocos casos también se libera el oro nativo. El oro liberado es amalgamado con mercurio para ser separados en un proceso posterior, o quema. En la molienda del mineral, se generan unos lodos o colas, llamados relaves en Perú. En estos lodos queda el oro que no se ha amalgamado.

Por lo tanto, del estudio textural del oro se deduce que una parte importante, no es liberado de la pirita mediante la molturación en los quimbaletes y por tanto no se recupera mediante la amalgamación con mercurio, lo que implica pérdidas económicas para los mineros artesanales.

También se han observado cantidades importantes de bismuto, presente como bismuto nativo y como sulfosales acompañado con cobre. Estos componentes podrían jugar un papel importante a la hora de la recuperación del oro (Anticoi y Alfonso, 2011).

La caracterización de los fluidos hidrotermales contribuye a la determinación del tipo de depósito. Los fluidos formadores de las vetas presentan una salinidad elevada y son pobres en CO_2 . La temperatura mínima a la que se formaron estas vetas de cuarzo es de 143-296 °C. El azufre que formó los sulfuros proviene predominantemente de una fuente magmática.

Mediante los estudios preliminares realizados se evidencia que éstos están genéticamente relacionados con los sistemas magmáticos. Aunque las vetas se encuentran en zonas con un cizallamiento muy elevado, la composición de los fluidos mineralizantes (pobre en CO_2 y rica en NaCl) juega en contra de la adscripción al tipo de

oro orogénico. La composición de los fluidos que han formado este yacimiento coincide con la que cabría esperar en el caso de depósitos epitermales de alta sulfuración, pero difiere claramente de los orogénicos ya que estos últimos, a diferencia de los de Misky, contienen significativas cantidades de CO₂ y también la salinidad en los fluidos de Misky es más elevada.

Los estudios realizados hasta el momento indican que hay grandes probabilidades de que estos yacimientos correspondan a la clase de los depósitos relacionados con intrusiones. Sin embargo, para confirmar estas hipótesis habría que realizar un estudio más extenso.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la ONG Minería para el Desarrollo por darnos la oportunidad de trabajar en las zonas mineras, y sobre todo a los compañeros que participan en los proyectos desplazándose en la zona o apoyándonos desde aquí. Deseamos expresar también nuestro agradecimiento AMASUC y RED SOCIAL, para orientarnos en nuestras estadias en el Perú. Este estudio no hubiese sido posible sin el financiamiento del Centre de Cooperació al desenvolupament (CCD) de la Universitat Politècnica de Catalunya.

REFERENCIAS

- Anticoi, H., Alfonso, P. (2011). Procesamiento sostenible del oro en San Cristóbal, sur del Perú. En este volumen.
- André-Mayer, A.S., Leroy, J.L., Bailly, L., Chauvet, A., Marcoux, E., Grancea, L., Llosa, F., Rosas, J. (2002). Boiling and vertical mineralization zoning: a case study from the Apacheta low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, southern Peru. *Mineralium deposita* 37, 452-464.
- Bodnar, R.J. (1990). Revised equation and table for freezing point depressions of H₂O-salt fluid inclusions. A: PACROFI IV, Fourth Biennial Pan-American Conference on Research on Fluid Inclusions, Program and Abstracts, Lake Arrowhead CA, v. 4, 15.
- Chauvet, A., Bailly, L., André, A.S., Monié, P., Cassard, D., Llosa Tajada, F., Rosas Vargas, J., Tuduri, J. (2006). Internal vein texture and vein evolution of the epithermal Shila-Paula district, southern Peru. *Mineralium Deposita* 41, 387- 410.
- Cobbing, E.J. (1982). The segmented Coastal Batholith of Peru: Its relationship to volcanicity and metallogenesis *Earth-Science Reviews* 18, 241-251.
- Steinmüller, K. (1999). Depósitos metálicos en el Perú. Su metalogénia, sus modelos, su exploración y el medio ambiente. Publ. INGEMMET, pp 171.
- Ohmoto, H. (1986). Stable Isotope Geochemistry of ore deposits. A: Valley JE, Taylor HP Jr, O'Neil R (eds.) *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes*. Mineral Soc Am Rev Mineral 16, 491-560.
- Vargas, A.R. (1978). Estudio geológico-minero de la faja aurífera Nazca-Ocoña. Informe Técnico, INGEMMET, 179 p. (inédito).

FIGURAS

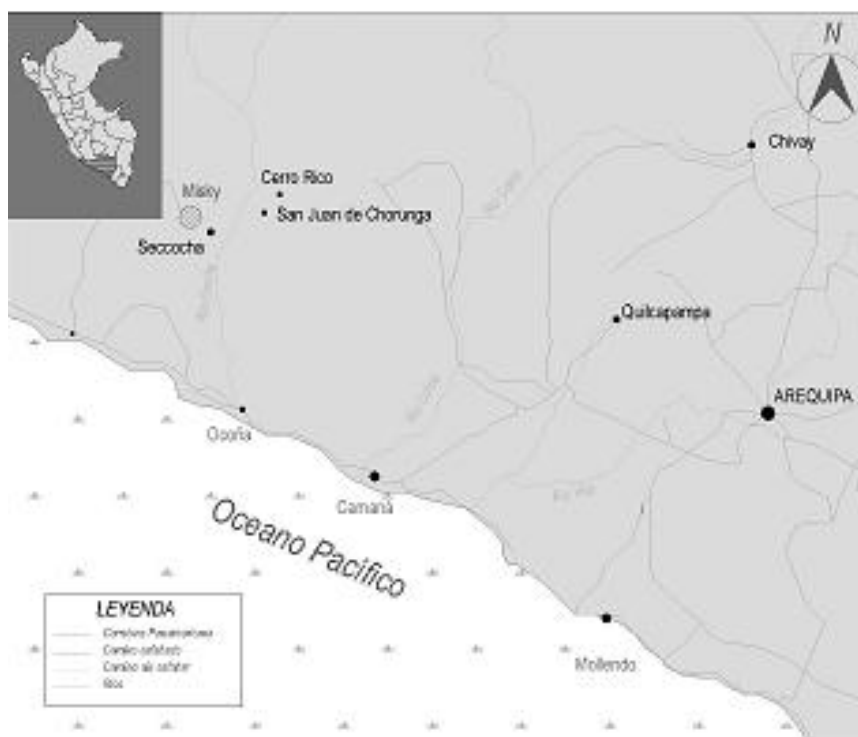


Figura 1. Situación del poblado minero de Misky, Perú. Corresponde a la página 282

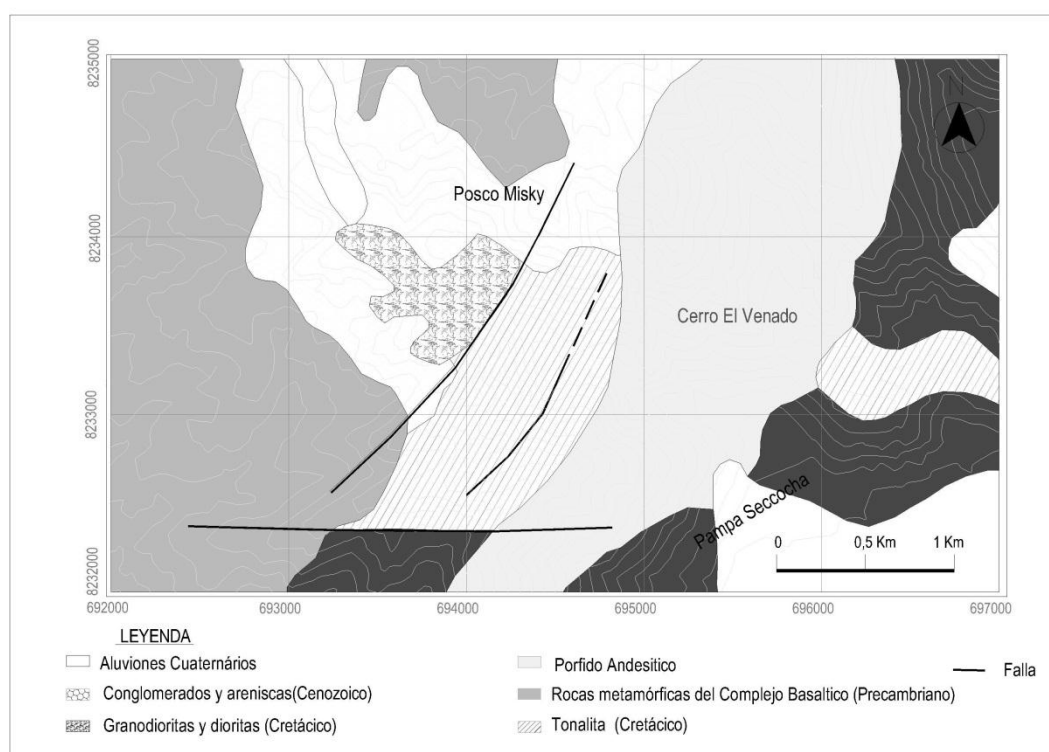


Figura 2. Mapa geológico del área de Misky. Corresponde a la página 283



Figura 3. Veta de cuarzo de dirección E-W y buzamiento de 70°, Misky. Corresponde a la página 283

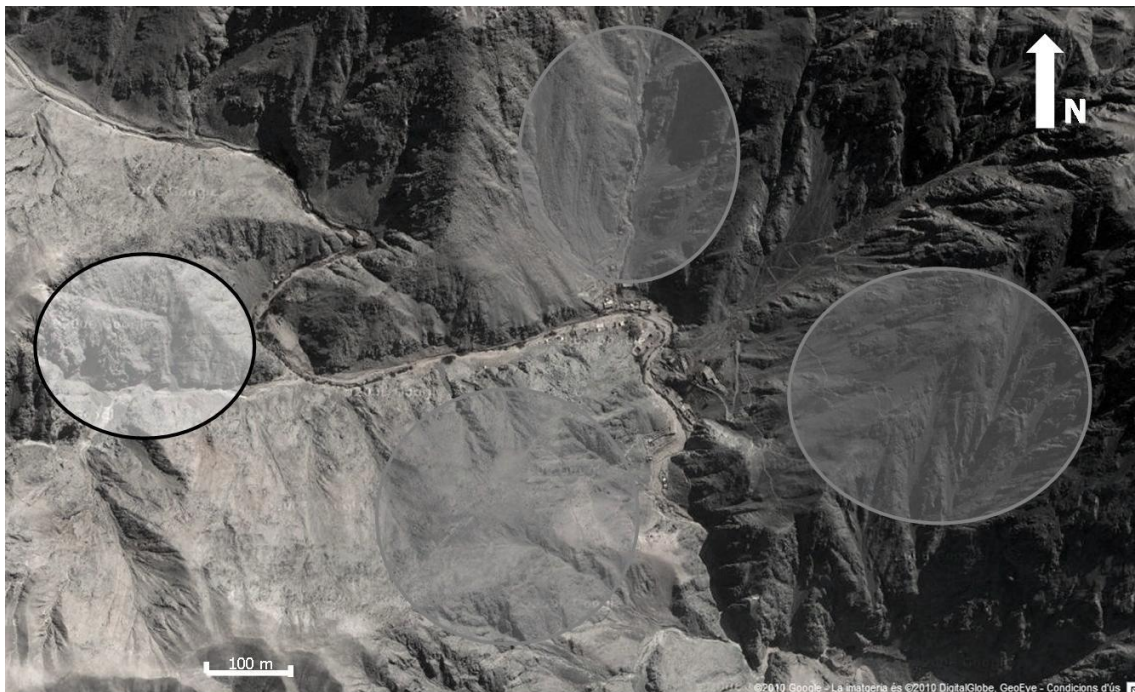


Figura 4. Situación de las vetas más importantes del asentamiento minero de Misky. (<http://maps.google.com/>). Corresponde a la página 283

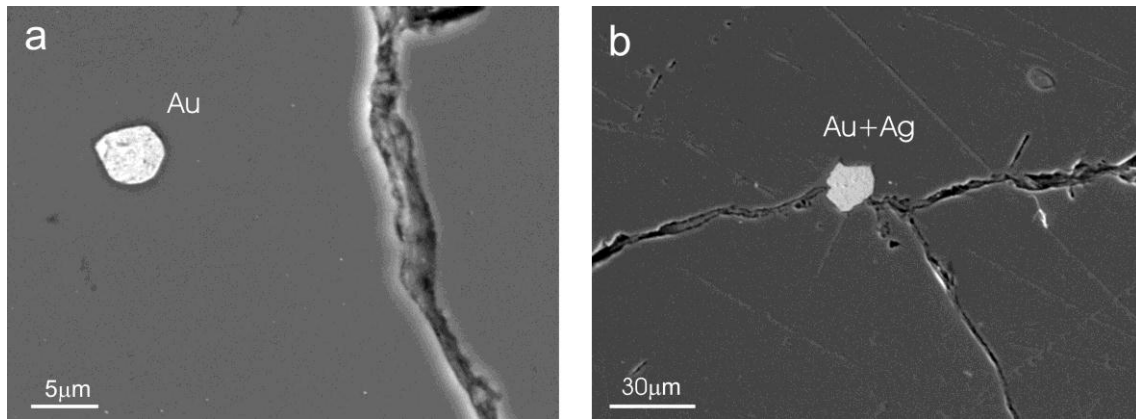


Figura 5. Imágenes obtenidas al microscopio electrónico de barrido de a) oro nativo encapsulado en la pirita, y b) electrum (aleación de oro y plata) formado en las fisuras. Corresponde a la página 285

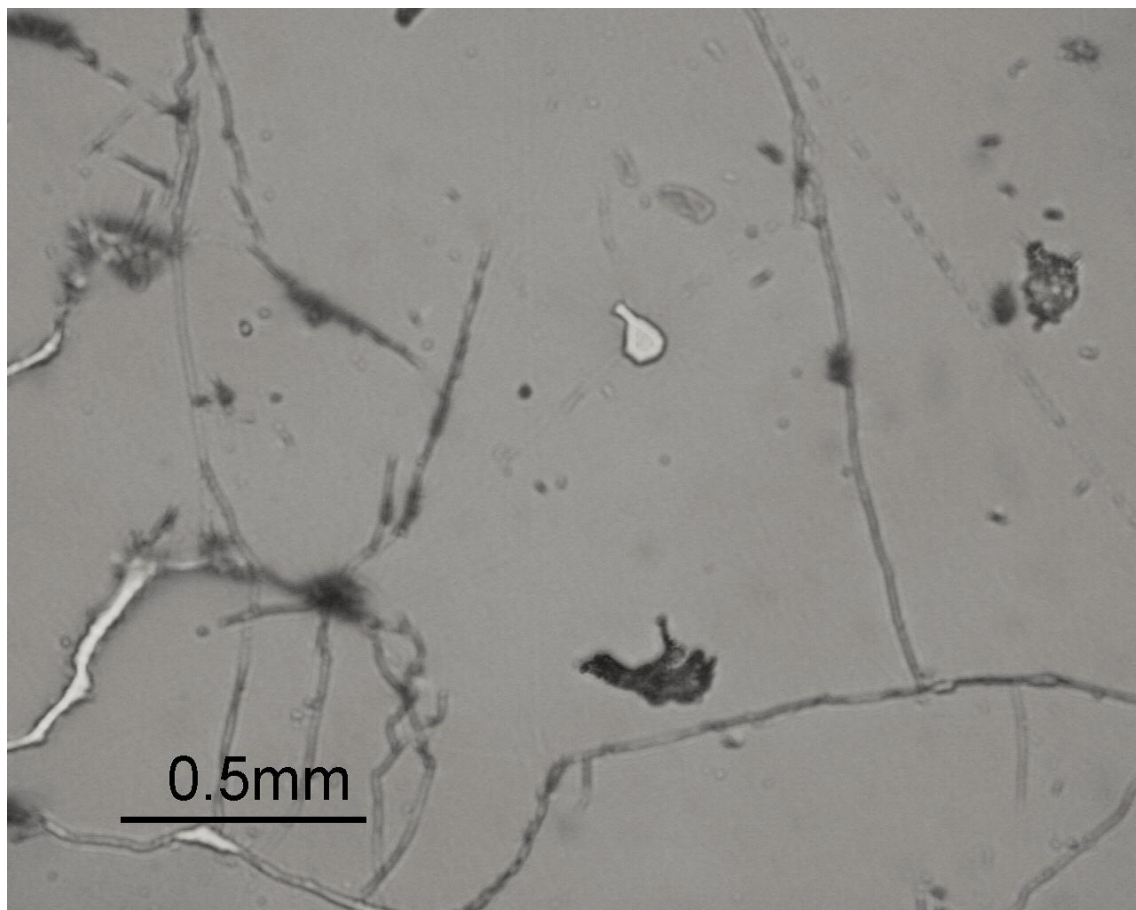


Figura 6. Imagen obtenida microscopio óptico de luz reflejada donde se observa el oro encapsulado en la pirita y el electrum en las fisuras. Corresponde a la página 286